

含三维内裂纹试件单轴拉伸裂纹扩展数值模拟研究

彭 博

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 以往研究针对三维内裂纹在单轴拉伸下的裂纹扩展与三维内裂纹尖端的应力强度因子变化较少,为量化研究三维内裂纹单轴拉伸下的裂纹扩展与应力强度因子的变化,对不同预制内裂纹角度在拉伸荷载作用下的裂纹扩展规律进行了数值模拟研究,将裂纹扩展过程及最终破坏形态与已有研究进行了对比。计算结果表明:当预制裂纹角度为 0° 时,预制裂纹呈现自相似扩展,当预制裂纹为其他角度时,预制裂纹尖端出现翼裂纹扩展,预制裂纹角度为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时,翼裂纹与原预制裂纹分别呈 18° 、 49° 、 64° 与 80° ;随着预制裂纹与水平方向的角度增大, I 型应力强度因子逐渐减小,对于同一预制裂纹角度来说,预制裂纹短轴顶点上的 I 型应力强度因子较其他方向要大;随着预制裂纹角度的增大, II 型应力强度因子整体上先增大后减小;对于同一种预制裂纹角度来说,预制裂纹的左端与右端(对应于距离为 0, 0.5, 1 处) II 型应力强度因子达到最大,而预制裂纹短轴处顶点(对应于距离为 0.25 和 0.75 处) II 型应力强度因子达到最小为 0;数值模拟结果与室内试验结果体现出较好的一致性。研究成果为正确认识轴拉情况下的三维裂纹扩展规律提供了一定的参考。

关键词: 三维内裂纹; Franc3D; 裂纹扩展; 标准立方体试件; 应力强度因子; 单轴拉伸

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0226-06

Numerical simulation of uniaxial tensile crack propagation in specimen with three-dimensional internal crack

PENG Bo

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The crack propagation of three-dimensional internal crack under tensile load has been a difficult and hot problem in geotechnical engineering. In order to quantitatively explore the crack propagation and the change of stress intensity factor of standard cubic specimen with three-dimensional internal crack under uniaxial tensile load, the variation of the crack propagation law of different prefabricated internal crack angles under tensile load was simulated numerically, and the crack propagation process and the final failure morphology were compared with the existing research. The results showed that the precast cracks exhibit self-similar propagation when the precast crack angle is 0 degree and when the precast cracks are at other angles, the wing crack propagates at the tip of the precast crack. When the angle of the precast crack is 15 degrees, 30 degrees, 45 degrees, 60 degrees, the wing crack and the original precast crack present an angle of 18 degrees, 49 degrees, 64 degrees and 80 degrees. With the increase of the angle between the precast crack and the horizontal direction, the relative stress intensity factor of mode I decreases gradually, and for the same prefabricated crack angle, the relative mode I stress intensity factor on the short axis vertex of prefabricated crack is larger than that in other directions. For the mode II stress intensity factor, the relative mode II stress intensity factor increases first and then decreases with the increase of the prefabricated crack angle. For the same precast crack angle, the left and right end of the precast crack (corresponding to the distance of 0/0.5/1) reaches the maximum for the mode II stress intensity factor, while the relative II type stress intensity factor of the vertex of the short axis of the precast crack (corresponding to the distance of 0/0.5/1) reaches the minimum of 0 at 0.25, 0.75,

收稿日期:2018-09-10; 修回日期:2018-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61503201)

作者简介:彭博(1989-),男,四川成都人,硕士,工程师,主要研究方向:建筑设计及其理论。

and the numerical simulation results are in agreement with the laboratory test results. The research results provide a certain reference for the correct understanding of the three - dimensional crack propagation law under the condition of axial tension.

Key words: 3D internal crack; Franc3D; crack propagation; standard cube specimen; stress intensity factor; uniaxial tensile

1 研究背景

裂隙与缺陷广泛存在于岩土和水利工程当中,与边坡失稳、坝体垮塌以及结构的使用寿命息息相关^[1-4],尤其是在水利岩土工程中的深埋地下结构,裂隙与软弱夹层在高应力作用下将成为结构稳定的关键因素^[5-6],因此,对于岩土及水利工程中的裂纹扩展演化规律一直是学术界的研究热点,同时也是难点问题。

对于工程中的岩体来说,抗拉强度要远远小于抗压强度^[7],含裂纹的岩体在受拉情况下更容易导致灾难性的后果,因此研究裂纹在拉应力下的裂纹扩展演化规律显得很有必要,针对于此,国内外许多学者进行了大量的室内试验与数值模拟研究。试验方面:喻勇等^[8]对弹性模量以及泊松比对巴西圆盘抗拉强度的影响进行了室内试验的分析;于庆磊等^[9]对含中心穿透型裂纹的巴西圆盘进行了室内试验,研究了不同角度预制裂纹在轴压下的裂纹扩展演化规律;张绪涛等^[10]利用改进的拉伸试验装置对砂岩、灰岩和花岗岩的抗拉强度进行了测定。数值模拟方面:鲁国富等^[11]对蒙皮材料试件进行了双轴拉伸数值模拟研究;黎坤运等^[12]利用扩展有限元对含不同角度穿透型裂纹进行了数值模拟,得到了裂纹扩展规律。然而上述研究仅仅针对二维裂纹或者三维穿透型裂纹,在实际情况中,裂隙往往以三维形态存在于岩体中,因此,对三维内裂纹在轴拉情况下的裂纹扩展规律的研究意义重大。

本文利用 Franc3D 软件,对于含不同角度预制内裂纹的标准立方体试件进行了单轴拉伸数值模拟研究,并将数值模拟结果与室内试验对比,验证了模拟的合理性,同时给出了裂纹前缘的应力强度因子的变化规律,为相应的工程实际提供了一定的参考。

2 计算理论

2.1 M 积分计算应力强度因子

J 积分可以表示为以下形式^[13]:

$$J = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} - \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \delta_{lj} \right) \frac{\partial q}{\partial x} d\Gamma \quad (1)$$

式中: δ_{ij} 为克罗狄克符号; q 为赋值函数; Γ 为计算积分域。

应力强度因子 K_I, K_{II}, K_{III} , 与 J 积分的关系可以表示为以下形式:

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (2)$$

式中: K_I, K_{II}, K_{III} 分别为 I 型、II 型、III 型应力强度因子; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

应力、应变及位移关系可以表述为:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(1)} + \sigma_{ij}^{(2)} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon_{ij}^{(2)} \quad (4)$$

$$u_i = u_i^{(1)} + u_i^{(2)} \quad (5)$$

$$K_i = K_i^{(1)} + K_i^{(2)} \quad (6)$$

其中应力、应变以及位移上的(1)与(2)为两种独立的线弹性状态,将公式(6)代入公式(2),可得:

$$J = J^{(1)} + J^{(2)} + M^{(1,2)} \quad (7)$$

其中:

$$J^{(1)} = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^{(1)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E} (K_{II}^{(1)})^2 + \frac{1+\nu}{E} (K_{III}^{(1)})^2 \quad (8)$$

$$J^{(2)} = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^{(2)})^2 + \frac{1-\nu^2}{E} (K_{II}^{(2)})^2 + \frac{1+\nu}{E} (K_{III}^{(2)})^2 \quad (9)$$

$$M^{(1,2)} = 2 \left[\frac{1-\nu^2}{E} K_I^{(1)} K_I^{(2)} + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)} + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \right] \quad (10)$$

其中:

$$K_I^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2a)} \quad (11)$$

$$K_{II}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2b)} \quad (12)$$

$$K_{III}^{(1)} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} M^{(1,2c)} \quad (13)$$

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left(\sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x} + \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x} - \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} \delta_{lj} - \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \delta_{lj} \right) \frac{\partial q}{\partial x} d\Gamma \quad (14)$$

因此利用 M 积分便可计算出 3 个应力强度因子, 本文所使用的 Franc3D 软件正是利用这样的原理, 计算出裂纹尖端的应力强度因子的分布, 同时可以依据应力强度因子判断出裂纹扩展的方向。

2.2 最大拉应力准则(MTS)

裂纹扩展准则采用最大拉应力准则(MTS), 裂纹将沿着最大周向应力 $\sigma_{\theta_{\max}}$ 方向进行扩展, 而环向应力可以表示为:

$$K_I^r(\theta) = \sigma_{\theta\theta} \sqrt{2\pi r} \\ = \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (15)$$

令 $\frac{\partial K_I^r(\theta)}{\partial \theta} = 0$, $\frac{\partial K_I^r(\theta)^2}{\partial \theta^2} \leq 0$, 可得开裂角 θ_0 为:

$$\theta_0 = \arccos \frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \quad (16)$$

3 计算模型与计算参数

建立标准立方体模型, 试样设计图与模型网格图如图 1 所示。其中试样尺寸为标准立方体试样尺寸, 长 \times 宽 \times 高为 50 mm \times 50 mm \times 100 mm, 插入三维内裂纹取文献[11]室内物理试验中的实际尺寸, 即 $2a \times 2b = 20$ mm \times 10 mm 的椭圆形三维内裂纹, 材料的弹性模量为 $E = 17.92$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.192$, 密度 $\rho = 2.3$ g/cm³。

计算边界条件为: 模型底部施加固定 3 个方向的位移约束, 模型上部施加固定 x 与 z 方向的位移约束, 同时 y 方向施加应力边界。

计算工况一共设定为 5 组工况, 分别为预制裂纹与水平方向夹角 α 呈 0°、15°、30°、45°、60° 情况, 由 Franc3D 软件依据最大拉应力准则计算出裂纹的扩展。

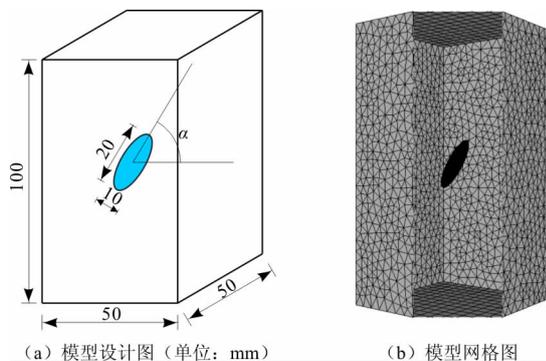


图 1 计算模型图

4 计算结果分析

4.1 不同工况下的裂纹扩展

预制裂纹角度分别为 0°、15°、30°、45° 和 60° 工

况下的裂纹扩展过程数值模拟结果见图 2。

由图 2 可见: 当预制裂纹角度为 0° 时, 裂纹面承受拉应力, 此时裂纹尖端 I 型应力强度因子最大, 而 II、III 型应力强度因子几乎为 0 (见 4.2 节应力强度因子分析), 预制裂纹呈现自相似扩展的规律, 即裂纹沿着原来裂纹面进行扩展, 最终裂纹贯穿裂纹面, 试件破坏; 当预制裂纹角度为 15° 时, 预制裂纹尖端裂纹呈现“翼裂纹”状扩展, 即裂纹前缘的扩展方向与原预制裂纹方向呈现一个较小的夹角。翼裂纹扩展与原预制裂纹方向呈 18° 夹角, 最终裂纹扩展逐渐趋向于垂直最大主应力方向, 随后裂纹贯穿试件表面, 试件破坏; 当预制裂纹角度为 30° 时, 预制裂纹扩展形态与 15° 较为类似, 即裂纹尖端呈现“翼裂纹”状扩展, 而翼裂纹与原预制裂纹尖端呈现 49° 夹角, 与预制裂纹角度为 15° 试件相比较, 最终裂纹扩展逐渐趋向于垂直最大主应力方向, 随后裂纹贯穿试件表面, 试件破坏; 当预制裂纹角度为 45° 时, 预制裂纹尖端仍然呈现“翼裂纹”状扩展, 翼裂纹与原预制裂纹尖端呈现 64° 夹角, 最终裂纹扩展逐渐趋向于垂直最大主应力方向, 随后裂纹贯穿试件表面, 试件破坏; 当预制裂纹角度为 60° 时, 翼裂纹与原预制裂纹方向角度更大, 为 80°, 最终裂纹扩展逐渐趋向于垂直最大主应力方向, 随后裂纹贯穿试件表面, 试件破坏。

4.2 应力强度因子分析

为直观描述裂纹尖端的应力强度因子随预制裂纹角度的变化规律, 定义相对应力强度因子不同计算方案下的裂纹尖端应力强度 $|K_i| / |K_{\max}|$ 为相对应力强度因子, 从而可以得到裂纹尖端的相对应力强度因子随裂纹尖端相对位置的变化规律, 预制裂纹的前缘相对位置定义为以裂纹右端为起点, 逆时针旋转一周回到起点一周长定义为 1, 如图 3 所示。

由图 3(a) 可见, 随着预制裂纹与水平方向的角度增大, 相对 I 型应力强度因子逐渐减小, 可见预制裂纹角度越大, 裂纹越难扩展, 同时对于预制裂纹从相对位置 0 到 0.5 的距离上, 相对 I 型应力强度因子呈现先增大后减小的规律, 可见预制裂纹短轴顶点上的相对 I 型应力强度因子较其他方向要大, 因而试件最终破坏是以裂纹先贯穿试件前后表面, 进而使试件破坏。由图 3(b) 可见, 随着预制裂纹角度的增大, 相对 II 型应力强度因子整体上先增大后减小, 预制裂纹 30° 与预制裂纹 60° 的相对 II 型应力强度因子几乎一致。值得注意的是, 预制裂纹角度为 0° 时相对 II 型应力强度因子为 0, 表明裂纹面处于

纯拉状态,与数值模拟中裂纹沿原裂纹面扩展的规律较为一致。对于同一种预制裂纹角度来说,预制裂纹的左端与右端(对应的位置为 0、0.5 和 1.0 处)相对 II 型应力强度因子达到最大,而预制裂纹短轴处顶点(对应的位置为 0.25 和 0.75 处)相对 II 型应力强度因子达到最小为 0。

5 与室内试验结果的对比

为验证本文数值模拟的合理性,取李术才等^[14]、张波等^[15]和张敦福等^[16]的试验结果进行对比,不同裂纹角度的裂纹扩展形态与本文的数值模拟结果对比见图 4~6。

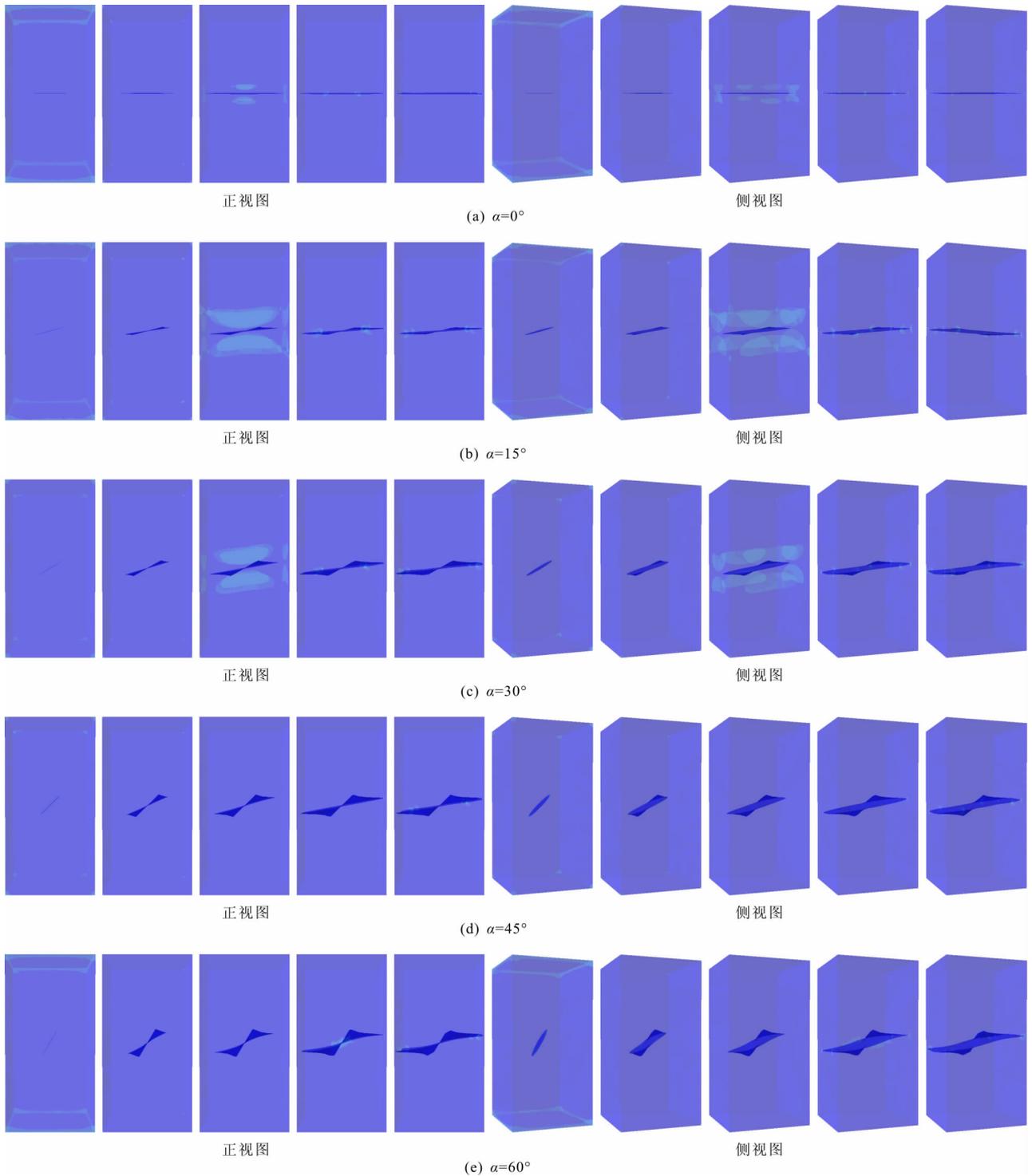


图 2 不同角度预制裂纹试件裂纹扩展过程

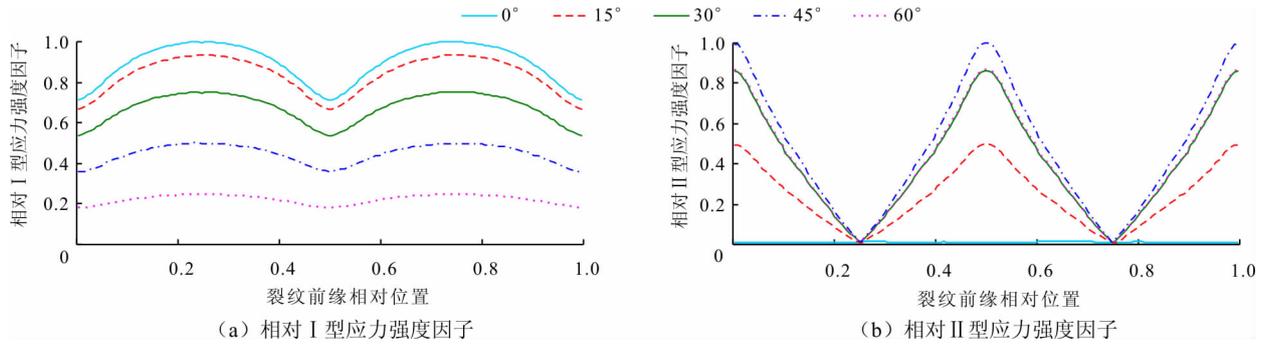


图3 裂纹前缘相对应力强度因子

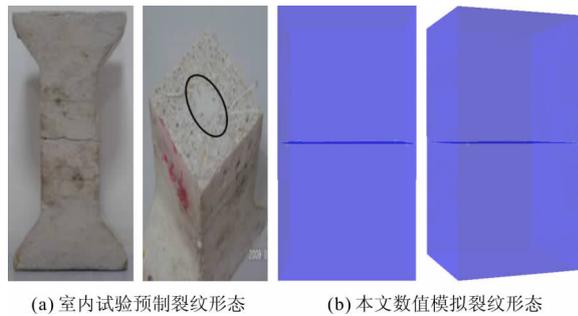


图4 预制裂纹角度为0°裂纹形态对比

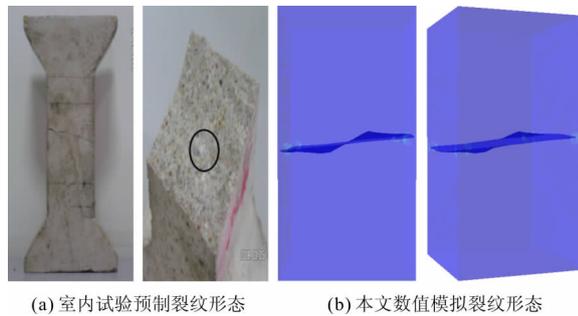


图5 预制裂纹角度为30°裂纹形态对比

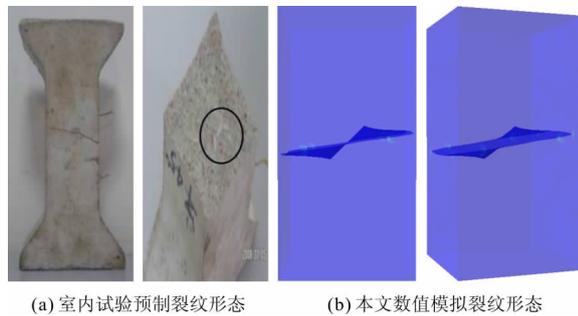


图6 预制裂纹角度为45°裂纹形态对比

由图4可见,对于预制裂纹角度为0°的情况,由于相对II型应力强度因子为0,裂纹面处于纯拉状态,则裂纹沿着原裂纹面呈自相似扩展,数值模拟结果也验证了室内试验的结论。

由图5和6可见,由于II型应力强度因子的存在,使得裂纹的扩展偏离原预制裂纹面,室内试验的

断口呈现出明显的翼裂纹扩展,这与数值模拟的结果较为吻合。

6 结论

本文利用 Franc3D 软件,对含不同角度(0°、15°、30°、45°和60°)三维内裂纹标准立方体试件单轴拉伸下的裂纹扩展过程、扩展形态以及应力强度因子进行了数值模拟分析,并将数值模拟结果与相关参考文献中的室内试验结果进行了对比分析,得出了以下结论:

(1)当预制裂纹角度为0°时,预制裂纹呈现自相似扩展,当预制裂纹为其他角度时,预制裂纹尖端出现翼裂纹扩展,预制裂纹角度为15°、30°、45°和60°时,翼裂纹分别与原预制裂纹角度呈18°、49°、64°与80°。

(2)随着预制裂纹与水平方向的角度增大,相对I型应力强度因子逐渐减小,对于同一预制裂纹角度来说,预制裂纹短轴顶点上的相对I型应力强度因子较其他方向要大。

(3)随着预制裂纹角度的增大,相对II型应力强度因子整体上先增大后减小,对于同一种预制裂纹角度来说,预制裂纹的左端与右端(对应于位置为0、0.5和1处)相对II型应力强度因子达到最大,而预制裂纹短轴处顶点(对应位置为0.25和0.75处)相对II型应力强度因子达到最小为0。

(4)将数值模拟结果与室内试验结果进行对比,证明了本文数值模拟的合理性。

参考文献:

[1]赵明,姚池.含预制裂隙的均质岩石巴西劈裂过程数值模拟[J].水电能源科学,2018,36(7):87-91.

[2]宋义敏,杨小彬,金璐,等.冲击载荷作用下岩石I型裂纹动态断裂试验研究[J].振动与冲击,2014,33(11):49-53+60.

[3]袁小平,刘红岩,王志乔.单轴压缩非贯通节理岩石尖

- 端塑性区及弹塑性断裂模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1679 - 1688.
- [4] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1 - 9.
- [5] 秦洪远, 黄丹, 刘一鸣, 等. 基于改进型近场动力学方法的多裂纹扩展分析[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 31 - 38.
- [6] 应鹏, 朱哲明, 周磊, 等. 中低速冲击下 I 型裂纹的动态断裂韧度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 338 - 345.
- [7] 李铁汉, 潘别桐. 岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [8] 喻勇, 徐跃良. 采用平台巴西圆盘试样测试岩石抗拉强度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1457 - 1462.
- [9] 于庆磊, 唐春安, 杨天鸿, 等. 平台中心角对岩石抗拉强度测定影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3251 - 3255 + 3260.
- [10] 张绪涛, 张强勇, 袁圣渤, 等. 岩石轴向直接拉伸试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2517 - 2523.
- [11] 鲁国富, 邱振宇, 高成军, 等. 基于双轴拉伸试验的飞艇蒙皮材料非线性分析[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1166 - 1171.
- [12] 黎坤运, 董世明, 华文, 等. 基于 X - FEM 的扁平巴西圆盘复合型断裂数值模拟分析[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(6): 9 - 12.
- [13] 孙欣, 朱哲明, 谢凌志, 等. 基于 SENDB 试样的砂岩复合脆性断裂行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2884 - 2894.
- [14] 李术才, 杨磊, 李明田, 等. 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 281 - 289.
- [15] 张波, 杨学英, 李术才, 等. 含两组叠置 X 型裂隙类岩石材料单轴拉伸破坏特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1987 - 1993.
- [16] 张敦福, 张波, 王卫东, 等. 单向轴压条件下内置椭圆三维裂纹扩展无网格方法的研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(3): 483 - 489 + 550.

(上接第 225 页)

- [16] NEMOTO K, WATANABE N, HIRANO N, TSUCHIYA N. Evaluation of flow anisotropy within a simulated shear fracture under stress conditions from shallow to deep reservoirs[J]. Transactions - Geothermal Resources Council, 2007, 31: 301 - 6.
- [17] MATSUKI K, KIMURA Y, SAKAGUCHI K, et al. Effect of shear displacement on the hydraulic conductivity of a fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(3): 436 - 449.
- [18] ZHOU Jiaqing, HU Shaohua, FANG Shu, et al. Nonlinear flow behavior at low Reynolds numbers through rough-walled fractures subjected to normal compressive loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 80: 202 - 218.
- [19] JAVADI M, SHARIFZADEH M, SHAHRIAR K. A new geometrical model for non-linear fluid flow through rough fractures[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1): 18 - 30.
- [20] SAKAGUCHI K, GOTO M, TAKANISHI T, et al. Experimental study on anisotropic and heterogeneous water flow in a sheared fracture[J]. Journal of MMIJ, 2008, 124(12): 748 - 755.
- [21] BARTON N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(4): 249 - 261.
- [22] PROVOST A M, VOSS C I, NEUZIL C E. Glaciation and regional groundwater flow in the Fennoscandian shield[J]. Geofluids, 2012, 12(1): 79 - 96.
- [23] CAO C, XU Z, CHAI J, et al. Mechanical and hydraulic behaviors in a single fracture with asperities crushed during shear[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 04018148.
- [24] QIAN J Z, CHEN Z, ZHAN H B, et al. Solute transport in a filled single fracture under non-Darcian flow[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(1): 132 - 140.
- [25] BRUSH D J, THOMSON N R. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes, and local cubic law simulations[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4): 1037 - 41.